

Геомеханіка і геотехніка

DOI: <https://doi.org/10.20535/2707-2096.1.2020.193950>

УДК 622.02:536:537

А. І. Крючков, к.т.н., доц.,
А.І. Бахтин, аспірант
КПІ ім. Ігоря Сікорського

ЧАСТОТНА ДИСПЕРСІЙНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ ГІРСЬКИХ КРІОГЕННИХ ПОРІД НА МАКРОРІВНІ

A.I. Kryuchkov Cand. Eng. Sc., Assoc. Prof.,
A.I. Bakhtyn, PhD student
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

FREQUENCY DISPERSION DEPENDENCE OF DIELECTRIC PERMITTIVITY OF CRYOGENIC ROCKS AT THE MACRO LEVEL

Метою цієї роботи є встановлення аналітичного виразу частотної дисперсійної залежності дійсної частини діелектричної проникності гірських криогенних порід за даними експериментальних досліджень.

У результаті теоретичних та експериментальних досліджень встановлено залежність діелектричної проникності гірських криогенних порід від частоти зовнішнього електромагнітного поля на макрорівні. Одержана аналітична залежність діелектричної проникності гірських криогенних порід від частоти у вигляді подвійної експоненти, яка дозволяє адекватно описати вплив зовнішнього електричного поля з урахуванням вологості та температури порід. Здійснено порівняння отриманих результатів з експериментальними даними інших авторів.

Діелектрична проникність знижується із зростанням частоти при всіх значеннях температури. Параметр залежності, який відповідає частоті в момент електричної релаксації (зона аномальної дисперсії) при зниженні температури зміщується в сторону низьких частот. Максимальне та мінімальне значення діелектричної проникності криогенних порід є сталими і не залежать від зміни температури для конкретної криогенної породи і залежать від вологості, мінералізації та морфологічної структури.

В даній роботі розроблено математичні вирази для опису частотної залежності діелектричної проникності при низькочастотному та високочастотному навантаженні за єдиною аналітичною залежністю.

Практична важливість отриманих результатів полягає у можливості встановлення сейсмо-акустичних, пружно-деформаційних та міцнісних властивостей гірських порід через вивчення електромагнітних властивостей криогенних порід.

Ключові слова: діелектрична проникність, питома електропровідність, частота, температура, криогенна порода, електромагнітне поле.

ВСТУП

Актуальність теми. Деформація гірських порід, як під дією прикладених механічних навантажень, так і під дією різного типу полів в кінцевому підсумку призводить до зміщення атомів при деформації внутрішнього електромагнітного поля.

Більшість гірських порід, як ґрунти так і скельні породи можна віднести до недосконалих діелектриків. Під дією зовнішнього електромагнітного поля в них виникає направлений поступальний рух вільних носіїв електричного заряду – струм

провідності j_{np} та коливально–обертове зміщення зв’язаних зарядів – поляризація (струм зміщення $j_{зм}$ за Максвелом):

$$\operatorname{rot} \vec{H} = j_{np} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \sigma \vec{E} + \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (1)$$

Наскрізна електропровідність кріогенних гірських порід σ зумовлена рухом вільних електронів, дірок, іонів, заряджених молекул та часток і визначається їх рухомістю та енергією активації. Експериментально встановлено [1, 2, 3, 4, 5, 6], що на питому провідність гірських кріогенних порід $\sigma = f_1(T, W, \omega)$ суттєво впливає температура $T < 0^\circ\text{C}$, вологість W , частота зовнішнього електромагнітного поля ω .

Поляризація кріогенних порід викликана квазіпружними зміщеннями центрів електричних зарядів частинок (електрона та іона поляризації) та квазіпружними поворотами осей дипольних моментів (орієнтаційна поляризація) і характеризується діелектричною проникністю матеріалу $\varepsilon = f_2(T, W, \omega)$, яка також залежить від вологості, температури і частоти [1].

Таким чином, електричні властивості кріогенних порід (σ , μ , ε) в змінному зовнішньому електромагнітному полі будуть визначати як щільність струму провідності \vec{j}_{np} , так і щільність струму зміщення $\vec{j}_{зм}$.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На даний момент проведенні значні експериментальні дослідження залежностей $\sigma = f_1(T, W, \omega)$ та $\varepsilon = f_2(T, W, \omega)$ [1–6], що дозволило поглибити знання про внутрішні електромагнітні процеси в кріогенних породах, їх структуру і властивості.

На рис.1 представленні результати подібних експериментальних досліджень впливу на діелектричну проникність мерзлого піску частоти електричного поля.

Встановлено [1], що запізнювання процесів провідності і поляризації (зміщення) по відношенню до зовнішнього електромагнітного поля призводить до втрат енергії в середовищі, яка витрачається на подолання опору зміщення зарядів в середині породи при їх впорядкованому русі.

Прийнято вважати, що електричні властивості кріогенних порід в загальному вигляді можуть бути описані двома комплексними показниками – діелектричною проникністю $\tilde{\varepsilon}$ або питомою електропровідністю $\tilde{\sigma}$ [1, 7].

Встановлено, що в результаті інерційності руху часток в електромагнітному полі вектор поляризації $\vec{P}(t)$ залежить від напруженості електромагнітного поля \vec{E} не лише в даний момент часу, але і від його значення в попередні моменти часу [7]:

$$\vec{P}(t) = \varepsilon_0 \int_0^\infty \alpha(t) \vec{E}(t - \tau) d\tau, \quad (2)$$

де $\tau = t - t'$ – враховує час запізнювання.

Взявши інтеграл Фур’є від вектору напруженості поля $\vec{E}(t)$ та вектору поляризації $\vec{P}(t)$

$$\vec{E}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty \vec{E}(t) e^{-i\omega t} dt, \quad \vec{P}(\omega) = \varepsilon_0 \alpha(\omega) \vec{E}(\omega), \quad (3)$$

отримаємо значення вектору електричної індукції в функції частоти

$$\vec{D}(\omega) = \varepsilon_0 \vec{E}(\omega) + \vec{P}(\omega) = \varepsilon_0 \varepsilon(\omega) \vec{E}(\omega) \quad (4)$$

Таким чином в змінному електричному полі діелектрична проникність кріогенної породи $\varepsilon(\omega)$ залежить не лише від властивостей самої породи, але і від частоти зовнішнього поля ω , що свідчить про частотну дисперсію проникності і є об'єктом широких досліджень [1, 3, 4, 6, 7], в яких враховується не лише частотна залежність, але і спільний вплив деяких найбільш суттєвих факторів.

Експерименти [1] показали, що при аналітичному описі отриманих експериментальних залежностей як для питомої провідності $\sigma(\omega)$, так і для діелектричної проникності $\varepsilon(\omega)$, їх необхідно розглядати як комплексні величини [1, 7]:

$$\tilde{\sigma}(\omega) = \sigma_1(\omega) + i\sigma_2(\omega) \quad (5)$$

$$\tilde{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon_1(\omega) + i\varepsilon_2(\omega) \quad (6)$$

де $\sigma_1(\omega)$ та $\varepsilon_1(\omega)$ – дійсні частини залежності; $\sigma_2(\omega)$ та $\varepsilon_2(\omega)$ – уявні частини залежності.

Під час впливу зовнішнього електромагнітного поля уявна частина діелектричної проникності ε_2 (коефіцієнт діелектричних втрат) кожен раз досягає максимуму з наближенням до верхньої частотної межі для кожного конкретного механізму поляризації. У випадку дипольної орієнтації максимум ε_2 має місце в мікрохвильовій області (НВЧ), для іншої поляризації – в інфрачервоній області (ІЧ), а для зміщення зв'язаних електронів – в ультрафіолетовій області (УФ) (рис.1). Дійсна частина діелектричної проникності ε_1 плавно зменшується із ростом частоти поля ω , але біля частотної межі присутнє її стрибкоподібне зниження для кожної області.

Постановка завдання. Метою цієї роботи є встановлення аналітичного виразу частотної дисперсійної залежності дійсної частини діелектричної проникності гірських кріогенних порід за даними експериментальних досліджень.

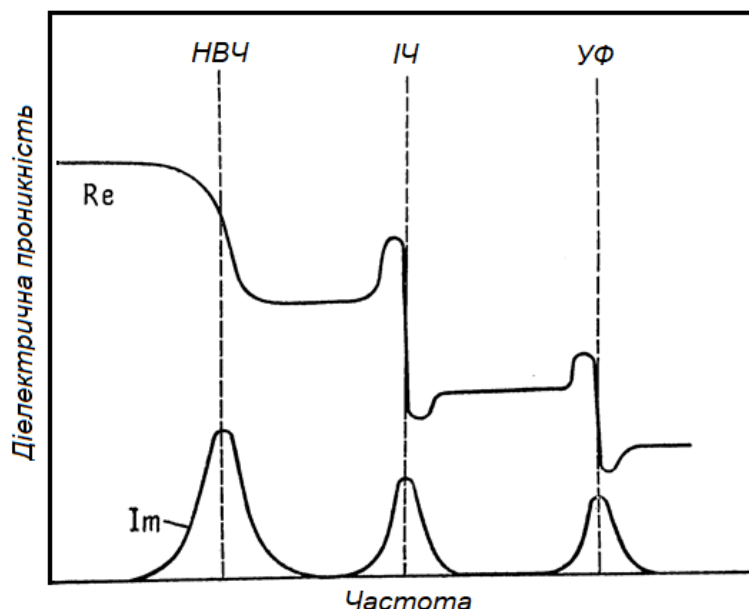


Рисунок 1 – Залежність дійсної Re та уявної Im частин комплексної діелектричної проникності від частоти прикладеного електромагнітного поля [8]

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Залежно від характеру зміни в часі і інтенсивності прикладеного електричного поля можуть переважати ті чи інші механізми, що зумовлюють поляризацію діелектрика. Крім атомно-молекулярних механізмів іонно-релаксаційної і дипольно-орієнтаційної поляризації, які достатньо вивчені для чистої води і льоду [1 – 6, 8], в кріогенних породах істотну роль відіграють процеси іонно-міграційної об'ємної поляризації. У ряді випадків (в квазістаціонарних низькочастотних полях) останні можуть чинити переважний вплив на сумарну поляризованість мерзлої породи конкретної будови і складу.

Для встановлення залежності зміни діелектричної проникності від частоти прикладеного навантаження використані експериментальні дослідження [1] для мерзлого кварцевого піску при різних температурах та вологості 1% (табл.1).

Таблиця 1 – Експериментальні значення залежності зміни діелектричної проникності від частоти зовнішнього електромагнітного поля [1]

Температура, °C	Діелектрична проникність (ϵ_1) при частоті прикладеного навантаження (кГц):								
	1,75	4	6	10	25	50	150	400	1000
-1,8	64,62	63,85	62,05	58,46	47,7	36,92	23,08	12,3	6,16
-2,2	64,62	63,85	56,97	50,76	35,3	20,02	14,56	7,68	6,16
-5	58	51,53	36,92	24,6	12,3	9,4	6,16	6,16	6,16

Попередні експериментальні та аналітичні дослідження перехідних енергетичних станів параметрів кріогенних гірських порід [9, 10], показали, що залежності представлені в табл. 1 можуть бути описані наступним рівнянням:

$$\epsilon_1(f) = (\epsilon_{1\max} - \epsilon_{1\min}) \left\{ \exp \left[- \exp \left(\frac{\lg f - \lg f_\theta}{\lg \sigma_f} \right) \right] \right\} + \epsilon_{1\min} \quad (7)$$

де $\epsilon_{1\max}$ – максимальне стале значення діелектричної проникності кріогенних порід при низькочастотному навантаженні; $\epsilon_{1\min}$ – мінімальне стале значення діелектричної проникності кріогенних порід при високочастотному навантаженні; f – поточне значення частоти діючого поля, кГц; f_θ – параметр залежності, який відповідає частоті електричної релаксації (зона аномальної дисперсії), кГц; σ_f – параметр залежності, який відповідає за частотну дисперсію електричної або механічної релаксації.

Максимальне та мінімальне значення діелектричної проникності кріогенних порід є сталими і не залежать від зміни температури для конкретної кріогенної породи і залежать від вологості, мінералізації та морфологічної структури.

Розрахункові параметри для кріогенного кварцевого піску при вологості $W = 1\%$ представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Розрахункові параметри для розглянутої кріогенної породи

Температура, °C	$\epsilon_{1\max}$	$\epsilon_{1\min}$	f_θ , кГц	σ_f , кГц
-1,8	70	6,16	90	4,7
-2,2	70	6,16	45	4,3
-5	70	6,16	9,5	3,2

Використовуючи рівняння (7) та одержані значення параметрів (табл. 2), розраховані значення діелектричної проникності на частотному діапазоні від 1 до 1000 кГц. Результати розрахунків представлені на рис. 2.

Враховуючи, що експериментальні точки лягають з невеликим відхиленням на аналітичні криві (рис. 2) можна зробити висновок, що досліджувана експериментальна закономірність може бути описана аналітичною залежністю (7) для частотної дисперсії мерзлого піску. Аналогічні розрахунки були зроблені для пісків з різними вологостями при різних температурах.

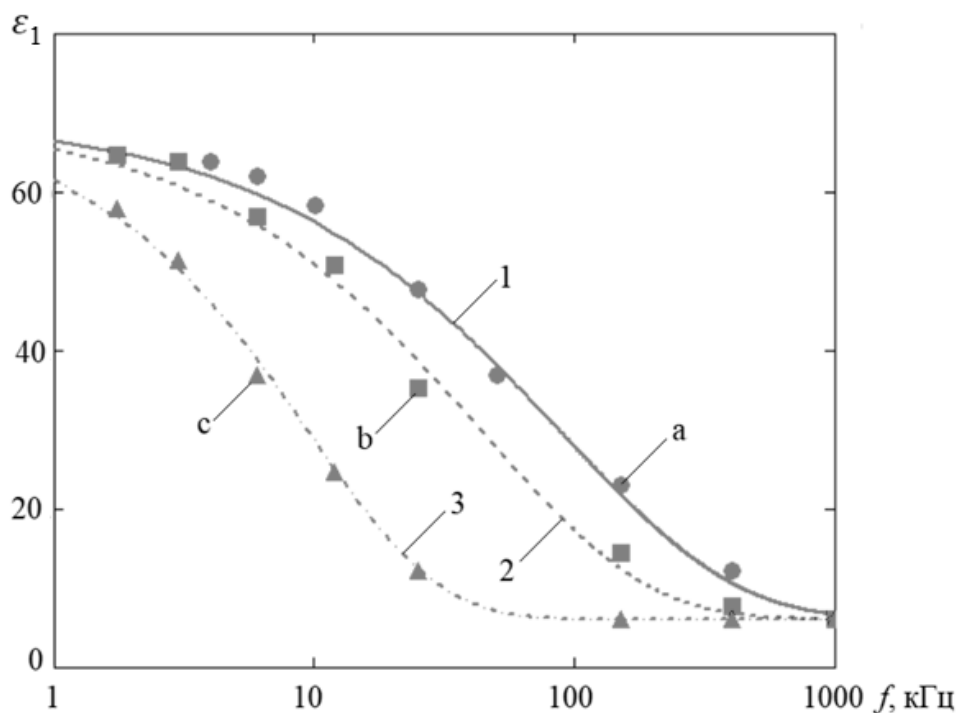


Рисунок 2 – Частотна залежність діелектричної проникності для кріогенного кварцового піску при вологості $W = 1\%$: 1, 2, 3 – аналітичні залежності діелектричної проникності ϵ_1 від частоти при температурі $-1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ відповідно; а, b, c – експериментальні значення діелектричної проникності [1]

Для перевірки адекватності аналітичного виразу (7) для залежності частотної дисперсії мерзлих пісків останній вираз представимо в безрозмірному вигляді:

$$y_{\epsilon_1}(f) = \exp\left[-\exp x_f\right], \quad (8)$$

де

$$y_{\epsilon_1}(f) = \frac{\epsilon_1(f) - \epsilon_{1\min}}{\epsilon_{1\max} - \epsilon_{1\min}}, \quad (9)$$

$$x_f = \frac{\lg f - \lg f_{\theta}}{\lg \sigma_f}. \quad (10)$$

Використовуючи рівняння (8) та розрахункові параметри з табл. 2, розраховані значення діелектричної проникності в безрозмірній системі координат (рис. 3).

Враховуючи те, що значення діелектричної проникності в безрозмірній системі координат (рис. 3) лягають з невеликим відхиленням на аналітичну криву можна зробити висновок, що вираз (7) може бути застосований для різних криогенних порід із різними термодинамічними параметрами.

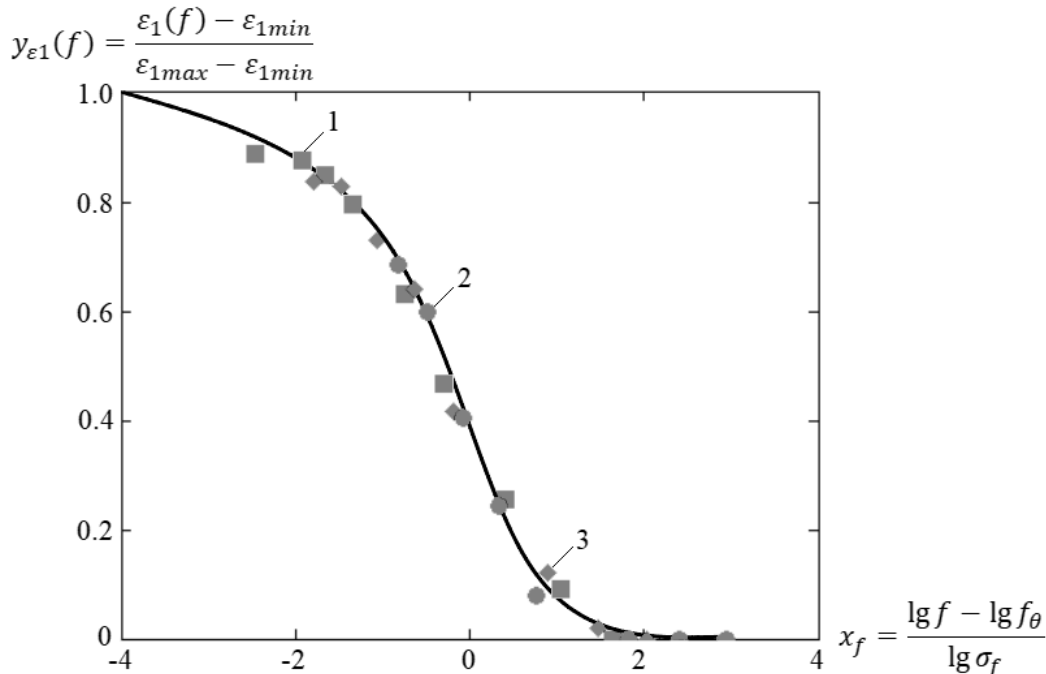


Рисунок 3 – Залежність діелектричної проникності від частоти діючого поля в безрозмірній системі координат при температурі -1,8 °C (1); -2,2°C (2); -5,0 °C (3)

ВИСНОВКИ

1. Діелектрична проникність ϵ_1 криогенної породи знижується із зростанням частоти при всіх значеннях температури. Наприклад при температурі -2,2°C ϵ_1 для мерзлого кварцового піску зменшується з 70 до 50 в частотному діапазоні від 1 до 10 кГц, з 50 до 10 при 10 – 200 кГц та з 10 до 6,15 при частотах >400 кГц.

2. Параметр залежності, який відповідає частоті в момент електричної релаксації (зона аномальної дисперсії) f_{θ} при зниженні температури зміщується в сторону низьких частот (від 90 кГц при -1,8°C до 9,5 кГц при -5°C, табл.2).

3. Діелектрична проникність криогенних кварцових пісків з вологістю $W=1\%$ при зростанні частоти до 1000 кГц знижується приблизно в 11 разів.

4. Одержана аналітична залежність діелектричної проникності ϵ_1 гірських криогенних порід (7) у вигляді подвійної експоненти дозволяє адекватно описати вплив зовнішнього електричного поля з урахуванням вологості та температури порід.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Фролов, А. Д. (1998). *Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов*. Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН.
2. Бойков, С. А., & Романовский, В. Е. (1980). Применение методов электроразведки постоянным током при решении задач мерзлотно-гидрогеологических исследований. *Мерзлотные исследования*, № 19, 145–153.

3. Ним, Ю. А., Омеляненко, А. В., & Стогний, В. В. (1994). *Импульсная электроразведка криолитозоны*. Новосибирск: СО РАН.
4. Снигерев, А. М. (1992). *Скважинная электрометрия мерзлой зоны литосферы*. Москва: Недра.
5. Scott, W., Sellmann, P., & Hunter, J. (1990). Geophysics in the Study of permafrost. *Geotechnical and environmental geophysics.*, №1, 355–384.
6. Vanhala, H., Lintinen, P., & Ojala, A. (2009). Electrical Resistivity Study of Permafrost on Ridnitsohkka Fell in Northwest Lapland, Finland. *Geophysics.*, №45(1–2), 103–118.
7. Федоренко, А. М. (1988). *Теоретическая физика. Классическая электродинамика*. Київ: Вища школа.
8. Блеймар, Дж. (1988). *Физика твердого тела: пер. с англ.* Москва: Мир.
9. Крючков, А. І., & Бахтин, А. І. (2017). Закономірність швидкості розповсюдження повздовжніх сейсмічних хвиль в залежності від температури та вологості гірських порід. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво»*, №33, 5–9. DOI: 10.20535/2079–5688.0.33.100620.
10. Крючков, А. І., & Бахтин, А. І. (2018). Закономірність зміни модулю зсуву в залежності від температури та пористості гірських порід. *Сучасні ресурсозберігаючі технології гірничого виробництва*, № 21, 18–22. DOI: 10.30929/2074–1537.2018.1.18–28

REFERENCES

1. Frolov, A. D. (1998). *Elektricheskie i uprugie svojstva merzlyh porod i ldov*. Pushino: ONTI PNC RAN.
2. Bojkov, S. A., & Romanovskij, V. E. (1980). *Primenenie metodov elektrorazvedki postoyannym tokom pri reshenii zadach merzlotno–gidrogeologicheskikh issledovanij*. Merzlotnye issledovaniya, No 19, 145–153.
3. Nim, Yu. A., Omelyanenko, A. V., & Stognij, V. V. (1994). *Impulsnaya elektrorazvedka kriolitozony*. Novosibirsk: SO RAN.
4. Snigerev, A. M. (1992). *Skvazhinnaya elektrometriya merzloj zony litosfery*. Moskva: Nedra.
5. Scott, W., Sellmann, P., & Hunter, J. (1990). Geophysics in the Study of permafrost. *Geotechnical and environmental geophysics.*, No 1, 355–384.
6. Vanhala, H., Lintinen, P., & Ojala, A. (2009). Electrical Resistivity Study of Permafrost on Ridnitsohkka Fell in Northwest Lapland, Finland. *Geophysics.*, No 45(1–2), 103–118.
7. Fedorenko, A. M. (1988). *Teoreticheskaya fizika. Klassicheskaya elektrodinamika*. Kiyiv: Visha shkola.
8. Blejmar, Dzh. (1988). *Fizika tverdogo tela: per. s angl.* Moskva: Mir.
9. Kriuchkov, A. I., & Bakhtyn, A. I. (2017). Zakonomirnist shvydkosti rozpovsiudzhennia povzdovzhnykh seismichnykh khvyl v zalezhnosti vid temperatury ta volohosti hirs'kykh porid. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskyi politekhnichnyi instytut». Serii «Hirnyctvo»*, №33, 5–9. DOI: 10.20535/2079–5688.0.33.100620.
10. Kriuchkov, A. I., & Bakhtyn, A. I. (2018). Zakonomirnist zminy moduli zsuvu v zalezhnosti vid temperatury ta pustotnosti hirs'kykh porid. *Suchasni resursozberihaiuchi tekhnologii hirnychoho vyrobnytstva*, № 21, 18–22. DOI: 10.30929/2074–1537.2018.1.18–28

Стаття надійшла до редакції 04.11.2019.